

基于并联机构及 MR 阻尼器的多维减振平台半主动控制研究

朱 伟,马履中,陈修祥,吴伟光,谢 俊

(江苏大学智能机械及机器人研究所,江苏镇江 212013)

[摘要] 分析了磁流变阻尼器的力学特性,将其应用于多维减振系统中。采用经典的三平移并联机构作为多维减振平台的主体机构,推导出其位置逆解公式;建立了系统动力学状态方程模型,以运动学方程得到的支路加速度作为输入信号,控制器采用了基于线性二次型最优控制理论的半主动控制算法。考虑到动态过程中机构动力学方程的复杂性,采用稳态方法对并联机构处于某一运动姿态的支路移动副振动进行控制,从而控制了整个平台的振动。仿真结果表明,所采取的控制算法有较好的控制效果。

[关键词] 并联机构;多维减振;磁流变阻尼器;半主动控制

[中图分类号] TH246;TP271 [文献标识码] A [文章编号] 10009-1742(2007)11-0063-05

由于并联机构具有结构简单、精确度高以及可实现多方向运动等特点,逐步在多维减振领域得到广泛应用。文献[1]将6自由度 Stewart 平台应用到大型射电望远镜的减振系统中,采用电机驱动、主动控制,可实现6自由度减振,效果明显,但其结构复杂、成本高及耗能大,其实用性受到限制。马履中、尹小琴等已先后将三自由度、四自由度和六自由度并联机构应用到多维减振中^[2~4],采用弹性阻尼系统作为减振执行器,结构简单、实用性强,取得了满意的效果,但其减振手段是被动的、不可控的。笔者在此基础上寻求一种既能控制减振、结构又简单、且实用性较强的多维减振机构和方法。

磁流变阻尼器(MR damper)是最新发展起来的半主动控制装置,通过改变其内部线圈中的电流来获得磁场强度的变化,从而使磁流变液体的粘度发生变化,并得到所需要的阻尼力。其特点是体积小、出力大、反应快和可靠性高;当控制电路部分失效时仍可作为被动式阻尼器工作,具有 fail - safe 的特

点。因此,MR 阻尼器在汽车悬架、桥梁、建筑等减振控制中得到了广泛的应用^[5~7]。

笔者尝试选用 MR 阻尼器作为多自由度减振的执行器,以三平移并联机构作为减振平台主体机构,对其减振效果进行分析研究。

1 MR 阻尼器的力学模型

磁流变液的流变特性能随着外加磁场强度的变化而改变,因而能实现磁流变液表观粘度无级可调。MR 阻尼器就是利用磁流变液的这一特点而设计的。图1为自行研制的 MR 阻尼器照片。磁流变液的本构关系可用 Bingham 模型来描述,即

$$\tau = \tau_y \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中 τ 为剪应力; τ_y 为磁流变液的剪切屈服应力; $\dot{\gamma}$ 为剪切应变速率; η 为磁流变液的动力粘度; sgn 为符号函数。

基于混合工作模式的 MR 阻尼器,其阻尼力由以压力工作模式的阻尼力和剪切工作模式的阻尼力

[收稿日期] 2006-10-16;修回日期 2006-12-29

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50375067);高等学校博士学科专项科研基金资助课题(20050299002);江苏大学高级人才启动基金项目(05JDC015)

[作者简介] 朱 伟(1976-),男,江苏泰兴市人,江苏大学博士研究生,研究方向:并联机器人,振动控制;马履中(1939-),男,浙江宁波市人,江苏大学教授,博士生导师,研究方向:并联机器人,多维减振

叠加构成,可表示为

$$F = c_e V(t) + f_c \operatorname{sgn}(V(t)) \quad (2)$$

$$\text{式中 } c_e = \frac{12\eta LA_p^2}{\pi Dh^3} + \frac{\pi DL\eta}{h}; f_c = \left[\frac{3LA_p}{h} + \pi DL \right] \tau;$$

L 为活塞的长度; η 为未施加磁场时磁流变液的粘度; A_p 为活塞有效作用面积; D 为活塞直径; h 为磁极与阻尼器内缸的间隙; $V(t)$ 为活塞与缸体间的相对速度。



图1 MR 阻尼器
Fig.1 MR damper

本系统所需的阻尼力相对较小,自行设计研制了一种小型 MR 阻尼器。通过试验,得到其阻尼力与线圈电流之间的关系如图 2 所示:电流在 0 ~ 1.8 A 之间变化时阻尼力增幅较大,阻尼效果明显;电流大于 1.8 A 时,磁流变液磁路达到饱和,阻尼力增加趋缓。

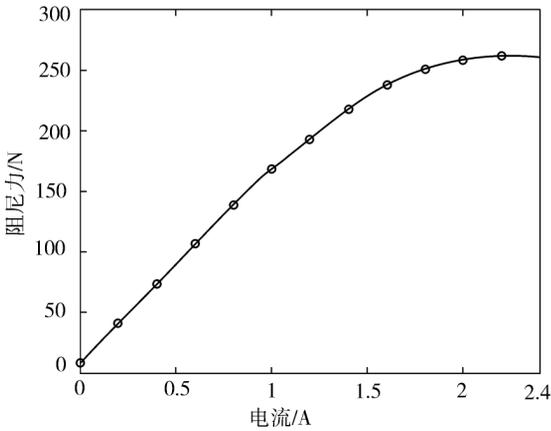


图2 阻尼力与电流之间的关系

Fig.2 Relation between damp force and current

2 减振平台机构设计及运动学分析

2.1 3-PUU 并联机构减振平台描述

以典型的三维减振为例,采用 3-PUU 并联机构

作为减振装置的主体机构,以 MR 阻尼器作为减振手段,其结构简图如图 3 所示。该装置由动平台、静平台及三条支链组成, O 、 P 分别是静、动平台的圆心。每条支链的可伸缩杆 $A_i C_i$ 的一端与静平台垂直固连于 A_i , A_i 均匀分布于静平台圆周; 另一端以转动副 C_i 与平行四边形杆组相连, 该平行四边形杆组的上端又以转动副 B_i 与动平台相连, B_i 亦均匀分布于动平台圆周, 并且 $OA_i // PB_i$ 。平行四边形四杆通过转动副两两相连, 可实现平面内转动。移动副 K_i 由刚度和阻尼合适的弹簧 k_i 与 MR 阻尼器构成的弹性浮动支撑。

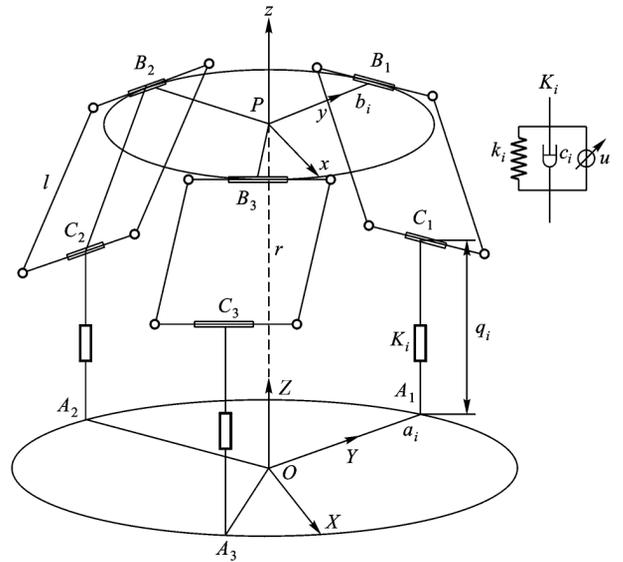


图3 机构简图

Fig.3 Diagram of mechanism

单纯的 3-PUU 并联机构可通过驱动三个可伸缩杆(MR 阻尼器)实现动平台运动,任意两条支链能够约束其绕 x 、 y 及 z 轴的旋转,因此动平台只能做空间平动^[7]。对于任意平行四边形杆,点 B_i 相对于 C_i 的运动方式实质上等同于在 B_i 和 C_i 处用一根虚拟杆相连,并在杆两端用虎克铰约束所实现的运动。

2.2 位置逆解

为了便于机构的位置分析,建立坐标系如图 3 所示。在静平台上建立定坐标系 $O-XYZ$, O 为静平台圆心,其中 Y 轴由圆心 O 指向 A_1 , Z 轴垂直于静平台竖直向上;在动平台上建立连体坐标系 $P-xyz$, P 为动平台圆心, y 轴由动平台圆心 P 指向点 B_1 , z 轴与 Z 轴同向。

假设 α_i 是定坐标系中 OA_i 与 X 轴的夹角, q_i 为 A_iC_i 的长度, 连杆 C_iB_i 的长度为 l , 而 $\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i$ 分别为 OA_i, PB_i 的矢量, 动静平台的半径分别为 r_p, r_o , 则动平台圆心 P 在定坐标系 $O-XYZ$ 中的位置矢量可表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{a}_i - \mathbf{R}_{Op} \mathbf{b}_i + q_i \mathbf{e} + l \mathbf{w}_i \quad (3)$$

式中 $\mathbf{a}_i = r_o [\cos \alpha_i, \sin \alpha_i, 0]^T$; $\mathbf{e} = [0, 0, 1]^T$; \mathbf{w}_i 为支链 C_iB_i 的单位矢量。由于该机构只做纯平动, 故动静平台的姿态始终保持平行, $\mathbf{R}_{Op} = \mathbf{E}_{3 \times 3}$, 点 \mathbf{b}_i 在动坐标系 $P-xyz$ 中的位置矢量可表示为

$$\mathbf{b}_i = r_o [\cos \alpha_i, \sin \alpha_i, 0]^T,$$

将式(1)化为

$$l \mathbf{w}_i = \mathbf{r} - \mathbf{a}_i + \mathbf{b}_i - q_i \mathbf{e} \quad (4)$$

将式(4)两边平方, 得

$$l^2 = (\mathbf{r} - \mathbf{a}_i + \mathbf{b}_i - q_i \mathbf{e})^T (\mathbf{r} - \mathbf{a}_i + \mathbf{b}_i - q_i \mathbf{e}) \quad (5)$$

由式(3)可解得各移动副的移动量为

$$q_i = z_p \pm \left\{ l^2 - [x_p + (r_o - r_p) \cos \alpha_i]^2 - [y_p + (r_o - r_p) \sin \alpha_i]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中 x_p, y_p, z_p 分别表示 P 点在静平台定坐标系中的坐标。由图 3 可知, 由于转动杆的约束, 有 $q_i < z_p$, 故式(6)中取较小值。

3 半主动控制策略

3.1 减振机构的数学模型

由于 3-PUU 并联机构三条支链相互耦合的作用, 使得动平台动力学方程十分复杂, 不利于控制的适时性要求。考虑到科氏力/向心力是速度的平方项, 在动平台速度较低的情况下影响很小, 故可忽略。对于在平衡位置近旁的微幅振动而言, 由于位移量很小, 在系统的弹性势能远远大于重力势能的前提下, 可忽略重力势能的影响。这样, 根据并联机构的位姿关系, 可得减振平台的动力学模型为

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} + \mathbf{w} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \mathbf{u} \quad (7)$$

式中 \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{C} 为阻尼矩阵; \mathbf{K} 为弹簧刚度矩阵; $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ 分别为三条支路上磁流变阻尼器的位移、速度和加速度; $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ 为并联机构雅可比矩阵; \mathbf{w} 为施加于动平台的扰动; \mathbf{u} 为 MR 阻尼器施加的阻尼力。

按照并联机构的位置逆解, 由式(6)可知, 动平台的振动情况由三支路移动副的振动决定, 必然随着支路振动的衰减而衰减。这样, 实际上控制动平台的三维振动可转化为对三支路移动副的控制。在动平台运动过程中, 其动态关系十分复杂, 不利于控

制算法的实现, 为此, 采用了稳态方法求解, 即只考虑并联机构处于平衡位置附近的某个姿态下对三支路移动副进行控制。

引入状态向量 $\mathbf{z} = [\mathbf{q}^T \quad \dot{\mathbf{q}}^T]^T$, 式(7)可写成状态方程形式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A} \mathbf{z} + \mathbf{B} \mathbf{u} + \Gamma \mathbf{w} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{z} + \mathbf{D} \mathbf{u} \end{cases} \quad (8)$$

其中 \mathbf{y} 为系统的输出向量, 这里取并联机构三个移动副的绝对加速度; $\Gamma \mathbf{w} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{w}$;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{C} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{O} \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{q}) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} \quad \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}];$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{q});$$

\mathbf{O} 和 \mathbf{I} 分别是零矩阵和单位矩阵。

3.2 LQR 控制算法

采用线性二次型最优控制算法(LQR)确定半主动控制中所需的最优控制力。根据式(6), 首先由动平台的运动估计参数 \mathbf{z} ; 然后采用 LQR 确定最优控制力, 即对性能指标函数 $J(t)$ 求解最小值:

$$J(t) = \int_0^{t_f} [\mathbf{y}^T \mathbf{Q} \mathbf{y} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}] dt \quad (9)$$

式中 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 分别为对状态向量和输入变量的加权矩阵; t_f 为控制作用的终止时间。

由线性二次型最优控制理论可知^[8], 若想使 J 最小化, 控制信号应为

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}(t) \mathbf{z} = -\mathbf{G} \mathbf{z} \quad (10)$$

其中 $\mathbf{P}(t)$ 为对称矩阵, 可由 Riccati 微分方程求得; \mathbf{G} 为状态反馈增益矩阵, 可由 Matlab 软件控制工具箱中的 lqry 函数求得。整个控制算法可由图 4 描述。

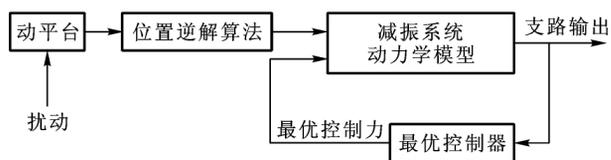


图 4 LQR 控制框图

Fig. 4 Frame diagram of LQR controlling

3.3 半主动控制算法

MR 阻尼器是通过变阻尼的方式产生所需的阻尼力, 其控制方向是单向的, 即只能提供与阻尼器运动速度相反方向的阻尼力。由 MR 阻尼器的力学模型可知, 其产生的阻尼力是有限的, 线圈中磁场为零

时,阻尼力为 f_{\min} ,当线圈中磁场达到饱和时,阻尼力为 f_{\max} ,从而可以确定 MR 阻尼器半主动阻尼力的控制原则为

$$\mathbf{u}_d = \begin{cases} f_{\min} & qu_{\text{opt}} \geq 0 \text{ 与 } u < f_{\min} \\ \mathbf{u}_{\text{opt}} & qu_{\text{opt}} \leq 0 \text{ 与 } u \in [f_{\min}, f_{\max}] \\ f_{\max} & qu_{\text{opt}} \leq 0 \text{ 与 } u > f_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中 \mathbf{u}_{opt} 为最优控制力。

4 算例分析

为验证使用 MR 阻尼器对并联机构减振平台的减振效果,用 Simulink 仿真软件对构建的 3-PUU 并联机构减振平台进行仿真分析。建立的减振平台相关参数如表 1 所示。

表 1 3-PUU 减振平台结构参数

Table 1 Parameters of 3-PUU damping platform

参数	数值
动平台半径/mm	150
静平台半径/mm	180
转动杆杆长/mm	160
阻尼器活塞杆长/mm	120
阻尼器活塞行程/mm	20
阻尼器及弹簧等效刚度/ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	90
阻尼器及弹簧等效阻尼/ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$	0.12
动平台质量/kg	15
静平台质量/kg	20
转动杆质量/kg	0.5
阻尼器活塞杆质量/kg	0.5

由图 2 可以看出,MR 阻尼器在电流为零时,阻尼力最小为 8 N;电流为 2.2 A 时,阻尼力最大为 260 N 左右。考虑到机构的摩擦力和移动副干扰力矩的影响,以及磁流变工作原理,可取 $f_{\min} = 10 \text{ N}$, $f_{\max} = 250 \text{ N}$,电流范围为 0 ~ 1.8 A。取振动平台在平衡位置附近的某一位置结构参数作为控制模型的输入状态参数(取平衡位置)。在动平台上外加瞬时冲击; x 方向为 13 N, y 方向为 15 N, z 方向为 13 N,并使静平台保持自由运动,观测三条支路上 MR 阻尼器在有控和无控状态下加速度输出情况。

图 5 至图 7 为并联机构三支路上 MR 阻尼器在无控制和半主动控制状态下的加速度响应曲线。通过对表 2 中相关参数的比较分析可以看出,采用了 LQR 半主动控制算法有效地抑制了三支路的振动加速度,振动减小的幅度都超过 60%,达到了预期的控制效果。

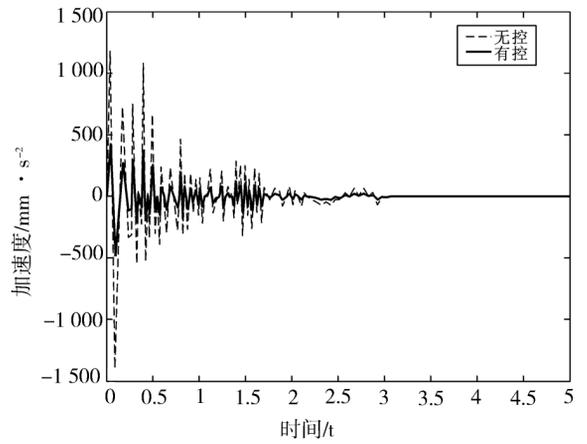


图 5 有控和无控下支路 1 的加速度响应

Fig. 5 Acceleration response of spur track 1st under on-control and off-control

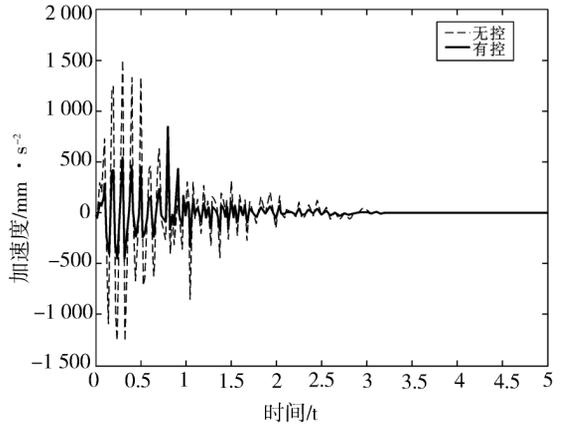


图 6 有控和无控下支路 2 的加速度响应

Fig. 6 Acceleration response of spur track 2nd under on-control and off-control

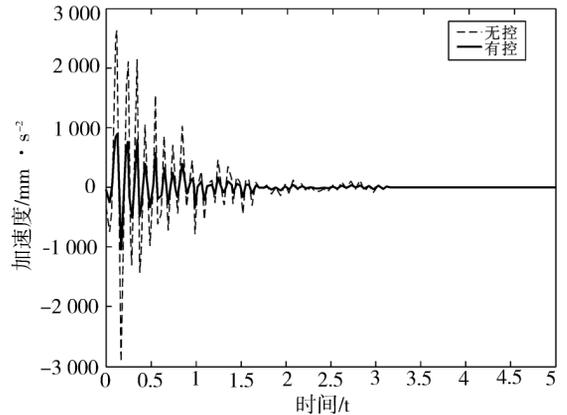


图 7 有控和无控下支路 3 的加速度响应

Fig. 7 Acceleration response of spur track 3rd under on-control and off-control

表2 三支路加速度响应相关参数

Table 2 Parameters relating with acceleration response of three spur tracks

参数/mm·s ⁻²	支路1		支路2		支路3	
	无控	有控	无控	有控	无控	有控
峰值	-1 400	-465.5	1 512	504.8	-2 986	-991
均方根	273.1	90.98	408.3	136.2	674.8	225.2

5 结论

1) 采用 3-PUU 并联机构作为三向减振主体机型,解决了交通运输中仪器仪表的振动问题。

2) 自行设计了小型 MR 阻尼器,并将其应用于并联机构多维减振,解决了减振控制中耗能高的弊端。

3) 3-PUU 并联机构是耦合性较强的机型,动态关系比较复杂,不利于控制。采用稳态方法,可对机构运动过程中某一姿态进行控制。

4) 建立并联机构的位置逆解方程和动力学状态方程模型,采用线性二次最优控制算法(LQR)进行控制,并在 Matlab 软件中仿真,控制效果明显。

参考文献

- [1] Yuan Cheng, Ge Xueren. The multi-body system modeling of the Gough-Stewart platform for vibration control [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 271: 599~614
- [2] 马履中, 尹小琴, 谢俊. 多自由度并联机构组合弹性阻尼减振装置分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2003, 24(1): 1~4
- [3] 马履中, 尹小琴. 多维减振平台主体机构的分析研究[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2004, 25(4): 281~284
- [4] 马履中, 尹小琴. 仿橡胶多自由度弹性阻尼减振装置[P]. 中国专利: ZL0225812914, 2003-10-08
- [5] Andrzej, Milecki. Investigation and control of magneto-rheological fluid dampers [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41: 379~391
- [6] Yang G. Large-scale MR fluid dampers; modeling and dynamic performance considerations [J]. Engineering Structures, 2002, 24: 309~323
- [7] 欧进萍. 结构振动控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [8] Tsai L W. Robot Analysis [M]. New York: a Wiley-Interscience Publication, 1999
- [9] Anderson B D O, Moore J B. Linear Optimal Control [M]. Englewood Cliffs; Prentice-Hall, 1971

Study on Semi-active Control of Multi-dim Damping Platform Based on Parallel Mechanism and MR Damper

Zhu Wei, Ma Lüzhong, Chen Xiuxiang, Wu Weiguang, Xie Jun
(Intelligent Machinery & Robot Institute, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

[Abstract] MR damper is analyzed on its mechanical characteristic, and is applied in multi-dimension damping in this paper. A kind of three-translation parallel mechanism is used as main mechanism of multi-dim damping, whose position and dynamics formula are deduced. The input signal of controller is from the result of equation of kinematics, and LQR is used as the semi-active control arithmetic. Considering complexity of the dynamics equation in dynamic process, a way is used in control progress when the mechanism is in a steady state through which the entire flat roof is limited adjacent to an equilibrium position. The result of emulation confirms that the controller is effective.

[Key words] parallel mechanism; multi-dim damping; MR damper; semi-active control